



Marco Antonio Pérez Rosas

**Análise de Dutos com Perda de Espessura
Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas**

Dissertação de Mestrado

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. José Luiz de França Freire
Co-orientador: Prof. Ronaldo Domingues Vieira

Rio de Janeiro

Maio de 2006



Marco Antonio Pérez Rosas

**Análise de Dutos com Perda de Espessura
Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

José Luiz de França Freire

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Ronaldo Domingues Vieira

Co-orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Luis Meniconi

Cenpes - Petrobras

Arthur Martins Braga

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

Carlos Alberto de Almeida

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

José Eugênio Leal

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 12 de maio de 2006

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, da autora e do orientador.

Marco António Pérez Rosas

Graduou-se em Engenharia Mecânica Universidad Nacional San Agustín de Arequipa - Perú em 2004.

Ficha Catalográfica

Rosas, Marco Antonio Pérez

Análise de Dutos com Perda de Espessura Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas / Marco Antonio Pérez Rosas; orientador: José Luiz de França Freire; co-orientador: Ronaldo Domingues Vieira.- Rio de Janeiro: PUC, Departamento de Engenharia Mecânica, 2006

159 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica

Inclui referências bibliográficas.

1. Engenharia mecânica – Teses. 2. Reparo. 3. Multicamadas. 4. coladas. 5. perda de espessura. 6. corrosão. 7. adesivo. 8. teste hidrostático. 9. extensimetria. 10. elementos finitos. I. Freire, José Luiz de França. II. Vieira, Ronaldo Domingues. III Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Al Señor Jesucristo, mi mamá Nancy, mi querida familia
y mis valiosos amigos

Agradecimientos

Ao professor José Luiz de França Freire e ao professor Ronaldo Domingues Vieira, pela paciência e orientação durante o desenvolvimento do curso de mestrado.

A meus amigos e colegas de laboratório, Garcia, Jesús, Leo e Maira que sem sua ajuda não teria concluído este trabalho.

Aos professores da PUC-Rio pelo ensino.

A todos os colegas da pós-graduação.

Ao Departamento de Engenharia Mecânica da PUC-Rio e seus funcionários, pela colaboração para comigo.

A todas aquelas pessoas que de alguma outra forma participaram no desenvolvimento da tese.

Resumo

Pérez Rosas, Marco Antonio; Freire, José Luis de França; Vieira, Ronaldo Domingues. *Análise de Dutos com Perda de Espessura Reparados com Multicamadas Metálicas Coladas*. Rio de Janeiro, 2006. 159p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Devido à crescente necessidade de aumentar a disponibilidade de uso imediato de dutos que sofreram danos por perda de espessura ou impacto de objetos estranhos, o uso de reparos tem tido cada vez mais importância. Neste trabalho, um novo método para o reparo de dutos com perda de espessura externa foi analisado. O reparo consiste na utilização de camadas metálicas coladas ao duto com adesivo epóxi. Existem vários tipos de reparos, mas o proposto tem a vantagem de ser facilmente aplicável, prescinde de soldagem, e apresenta módulo de elasticidade alto, o que permite uma redução na deformação total presente na região do defeito. Este novo método de reparo tem como objetivo devolver a integridade estrutural do duto de uma forma simples e econômica. Para conhecer o comportamento e avaliar este tipo de reparo, utilizaram-se métodos analíticos, experimentais e numéricos. Fez-se uso da técnica de elementos finitos pela grande vantagem de poder considerar a não linearidade do material, já que foram levadas em consideração situações de estado limite para o cálculo das pressões que originam a plastificação e a ruptura do duto. Foi desenvolvido um modelo analítico para o dimensionamento do reparo, que permite analisar o comportamento das tensões na região do defeito para cada pressão aplicada, procedimento útil em uma seleção ótima do reparo. Na abordagem experimental foram testados oito espécimes tubulares: dois sem defeitos e seis com defeitos usinados para simular a perda de espessura, dos quais cinco foram reparados com diferentes números e tipos de camadas. Os espécimes foram devidamente instrumentados para a obtenção de dados de pressões, variações volumétricas e deformações ocorridas em pontos localizados nos espécimes tubulares. O duto reparado com quatro camadas de aço de baixo carbono e o duto reparado com duas camadas de aço inox 304 suportaram a pressão de ruptura de um duto sem defeito, ambos rompendo em seções afastadas daquelas reparadas. Os dutos

reparados com uma, duas e três camadas de aço de baixo carbono romperam na região do defeito. Os resultados experimentais obtidos comprovaram a eficiência da nova técnica de reparo proposta, e foram satisfatoriamente previstos pelos modelos numéricos e analíticos.

Palavras – chave

Reparo, duto, multicamadas, coladas, perda de espessura, corrosão, adesivo, teste hidrostático, extensimetria, elementos finitos.

Abstract

Pérez Rosas, Marco Antonio; Freire, José Luis de França; Vieira, Ronaldo Domingues. Analysis of Pipeline with External Metal Loss Repaired with Steel-Adesive-Repair System. Rio De Janeiro, 2006. 159p. MSc. Dissertation - Departamento de Engenharia Mecânica, Pontificia Universidade Catolica de Rio de Janeiro.

Due to increasing need to prolong the availability of immediate use of the pipeline that had suffered to damages of metal loss or strange object impact, the use of repairs has each time more importance. In this work, a new repair system to be utilized on pipeline with external metal loss, was analyzed. The repair system is composed of pre-curved thin layers of steel lamina, which are set in place on the external metal loss defect area of a pipe and cement in place with epoxy resin. There are many types of repair system, but the use of this type of system avoids the need for field welding, and presents high elasticity module, it allows a reduction in the present total deformation in the region of the defect. This new repair system has as objective to return the structural integrity of the pipeline of a simple and economic way. To know the behavior and to evaluate this type of repair, analytical, experimental and numerical methods were used. The use of the finite elements method has the great advantage of being able to consider non linearity of the material for the calculate of the rupture pressure. An analytical model to project the repair was developed, this can analyze the behavior of the stress in the region of the defect for each applied pressure, useful procedure in an excellent election of the repair. In the experimental boarding eight pipe specimens were tested: two without defects and six with defects to simulate the loss of thickness, of which five were repaired with different numbers and types of layers. The specimens were instrumented to obtain data of pressures, volumetric variations and deformations, occurred in the specimens. The pipe repaired with four steel layers of low carbon and the pipe repaired with two stainless steel layers 304 did supported the pressure of rupture of a pipe without defect, both did breach in sections distant those repaired. The pipeline repaired with one, two and three steel layers of low carbon had breached in the region of the defect. The experimental results did prove the efficiency of the new repair system, and satisfactorily had been foreseen by the numerical and analytical models.

Keywords

Repair, pipeline, pipe, multilayer, epoxy resin, loss of thickness, corrosion, adhesive, hydrostatic test, finite elements.

Sumário

1. Introdução	21
1.1. Objetivo	21
1.2. Considerações Iniciais	21
1.3. Métodos Convencionais de Reparo para Dutos com Defeitos	22
1.4. Alcance do Trabalho	23
1.5. Reparo Utilizando Multicamadas Metálicas Coladas	24
1.6. Roteiro da Dissertação	26
2. Fundamentos para a Avaliação de Integridade de Dutos	27
2.1. Integridade Estrutural em Dutos	28
2.1.1. Critérios de Resistência	28
2.1.2. Tensões em Dutos sem Defeito	30
2.1.3. Tensões em Dutos com Defeitos de Corrosão	31
2.1.4. Avaliação de Componentes Estruturais Utilizando os Critérios de Aceitação	33
2.1.5. Noções Básicas da Plasticidade	35
2.1.6. Relações Tensão-Deformação	36
2.2. Aspectos Básicos do Emprego de Adesivos	38
2.2.1. Materiais Adesivos	38
2.2.2. Seleção do Adesivo	38
2.3. Tensões nas Juntas Coladas	42
2.3.1. Distribuição de Tensões numa Junta Colada	44
2.3.2. Ruptura de uma Junta Colada	
3. Modelagem Numérica	47
3.1. Introdução	48
3.2. Especificações para a Análise Não Linear	49
3.2.1. Análise Incremental não Linear	49
3.2.2. Não Linearidades nos Dutos	52
3.3. Descrição da Modelagem Numérica	54
3.4. Análise dos Resultados Numéricos	63

3.4.1. Distribuição das Tensões em um Duto com Reparo	63
3.4.2. Estudo da Tensão Circunferencial	64
3.4.3. Comportamento das Tensões com a Variação de Parâmetros nos Modelos Numéricos	67
3.4.3.1. Diferentes Profundidades de Defeito	68
3.4.3.2. Diferentes Materiais de Reparo	69
3.4.3.3. Diferentes Geometrias de Defeito	71
3.4.4. Modelo Simplificado	72
3.4.5. Variação do Número de Camadas Metálicas no Reparo	73
3.4.6. Estudo da Espessura das Camadas no Reparo	76
3.4.7. Estudo das Deformações no Duto Reparado	78
3.4.8. Estudo da Tensão Cisalhante no Adesivo	80
3.4.9. Estudo das Terminações das Camadas Metálicas	81
3.4.10. Discussão dos Resultados Numéricos	83
4. Modelagem Analítica	88
4.1. Introdução	88
4.2. Princípios Básicos	89
4.3. Tensões Equivalentes nos Regimes Elástico e Plástico	94
4.4. Aplicação das Equações nas Regiões Elásticas e Elasto-Plásticas do Comportamento do Sistema Duto-Reparo	96
4.5. Programa para a Aplicação da Modelagem Analítica	104
5. Abordagem Experimental e seus Resultados	107
5.1. Introdução	107
5.2. Preparação e Instrumentação dos Espécimes Tubulares	108
5.3. Dispositivo Experimental	113
5.3.1. Sistema de Pressão	113
5.3.2. Sistema de Aquisição de Dados	114
5.4. Análise dos Resultados Experimentais	116
6. Avaliação e Comparação dos Resultados	130
6.1. Comparações Numéricas, Analíticas e Experimentais	130
6.2. Comparações Adicionais dos Modelos Analítico e Numérico	136

6.3. Exemplo de Aplicação	138
7. Conclusões, Limitações e Sugestões	143
7.1. Conclusões	143
7.2. Limitações e Sugestões	147
Referências bibliográficas	148
Apêndice	
A. Fator de eficiência de junta longitudinal soldada	150
B. Caracterização do Material Utilizado	150
C. Determinação da Espessura Ideal da Camada Metálica no Reparo	152
D. Cálculo das Tensões a partir das Deformações Experimentais	154
E. Variante da Técnica de Reparo Proposta	159

Lista de Figuras

Figura 1.1 – Aplicação de um reparo com três camadas.

Figura 2.1. Paralelepípedo elementar representativo de um estado de tensão.

Figura 2.2. Estado de tensões num tubo sem carregamento de torção e pressão interna.

Figura 2.3 – Idealização da geometria de um defeito para a avaliação.

Figura 2.4 – Representação esquemática de alguns modelos de materiais.

Figura 2.5 – Junta colada simples.

Figura 2.6 Resistência da junta colada simples

Figura 2.7 – Junta colada no reparo de dutos

Figura 2.8 Distribuição das tensões cisalhantes na junta colada [16]

Figura 2.9 – Tipos de falha nas juntas coladas [14].

Figura 2.10 - Simulação numérica da falha adesiva e coesiva [13].

Figura 3.1 Método de Newton-Raphson [19].

Figura 3.2 – Não linearidades no duto sem defeito

Figura 3.3 - Elementos 2D

Figura 3.4 – Elementos 3D

Figura 3.5 – Curvas bilineares tensão vs deformação de engenharia e real

Figura 3.6 - Curva multilinear tensão vs deformação e ampliação da região (i)

Figura 3.7 – Dimensões na modelagem 2D

Figura 3.8 – Dimensões na modelagem axisimétrica

Figura 3.9 – Malhas testadas.

Figura 3.10 – Detalhes da modelagem 2D

- Figura 3.11 – Detalhes na modelagem 3D.
- Figura 3.12 – Detalhes na modelagem axisimétrica.
- Figura 3.13 – Duto carregado, modelo linear 3D.
- Figura 3.14 – Componente da modelagem numérica.
- Figura 3.15 – Regiões do comportamento.
- Figura 3.16 – Transição elasto-plástica na região do defeito
- Figura 3.17 – Modelos com diferente profundidade de defeito.
- Figura 3.18 – Comportamento das tensões para o modelo com $C=0.7$ e sua comparação com o modelo de $C=0.3$.
- Figura 3.19 – Comportamento das tensões num reparo com as mesmas propriedades mecânicas que o duto.
- Figura 3.20 – Geometrias transversais dos defeitos estudados.
- Figura 3.21 – Discretização dos modelos reparados com diferentes geometrias transversais do defeito.
- Figura 3.22 – Comportamento das tensões para os três tipos de defeito.
- Figura 3.23 – Modelo simplificado.
- Figura 3.24 – Comportamentos nos modelos de uma, duas, três e quatro camadas com igual espessura de chapa no reparo.
- Figura 3.25 – Modelos com diferentes espessuras das camadas metálicas, com a mesma espessura equivalente de reparo em todos os modelos.
- Figura 3.26 – Tensões circunferências no defeito
- Figura 3.27 – Deformações globais no modelo 3D de $\frac{1}{4}$ de simetria.
- Figura 3.28 – Deformações no defeito e fora do reparo no modelo 3D de $\frac{1}{4}$ de simetria.
- Figura 3.29 – Tensões cisalhantes no adesivo.
- Figura 3.30 – Distribuição das tensões cisalhantes na primeira camada de adesivo.
- Figura 3.31 – Distribuição de tensões ao longo da parede do duto.
- Figura 3.32 – Comparação do uso da não linearidade geométrica no duto.
- Figura 3.33 – Comparação dos modelos 3D e 2D utilizando materiais multilineares e bilineares.

Figura 3.34 – Comparação dos materiais bilineares e multilineares.

Figura 3.35 – Comparação dos modelos 3D e 2D utilizando materiais multilineares e bilineares.

Figura 4.1 – Estado de tensões e deformações num ponto do defeito

Figura 4.2 - Área da interface do programa

Figura 4.3 – Resultados no programa

Figura 5.1 - Dimensões dos espécimes tubulares

Figura 5.2 – Instrumentação no defeito

Figura 5.3 - Distribuição das camadas metálicas

Figura 5.4 - Etapas na colagem.

Figura 5.5 Posição dos extensômetros elétricos.

Figura 5.6 - Sistema de pressão.

Figura 5.7 - Sistema de aquisição de dados.

Figura 5.8 - Espécimes testados.

Figura 5.9 - Deformações nos dutos sem defeito.

Figura 5.10 - Deformações no duto com defeito não reparado

Figura 5.11 - Deformações no duto de uma camada no reparo

Figura 5.12 - Vazamento no espécime de uma camada no reparo.

Figura 5.13 - Ruptura do espécime de uma camada.

Figura 5.14 - Deformações nos espécimes de duas camadas no reparo.

Figura 5.15 - Vazamento no espécime de duas camadas no reparo.

Figura 5.16 - Deformações nos espécimes de três camadas no reparo.

Figura 5.17 - Vazamento no espécime de três camadas no reparo.

Figura 5.18 - Deformações nos espécimes de quatro camadas no reparo.

Figura 5.19 - Ruptura no espécime de quatro camadas no reparo.

Figura 5.20 - Análise das deformações circunferências na região do defeito.

Figura 5.21 - Deformação circunferencial na região do defeito para um espécime de N camadas no reparo.

Figura 5.22 - Comparação das deformações circunferenciais na parede externa dos reparos.

Figura 5.23 - Gráfico volume injetado de água no espécime vs pressão.

Figura 5.24 - Gráfico corrigido volume injetado de água no espécime vs pressão.

Figura 5.25 – Abaulamento nos defeitos.

Figura 5.26 - Deformações no espécime duas camadas de aço inox no reparo.

Figura 5.27 - Comparação das deformações circunferências para os espécimes de quatro camadas de aço de baixo carbono e duas camadas de aço inoxidável no reparo.

Figura 5.28 – Gráfico corrigido volume injetado de água no espécime vs pressão

Figura 5.29 – Tensões equivalente no espécime DRC 006.

Figura 6.1 – Comparação numérica e experimental mediante o gráfico pressão vs deformação no defeito para o espécime de quatro camadas

Figura 6.2 – Comparação numérica, experimental-teórica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de quatro camadas.

Figura 6.3 – Comparação numérica e experimental mediante o gráfico pressão vs deformação no defeito para o espécime de três camadas

Figura 6.4 – Comparação numérica, experimental-teórica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de três camadas.

Figura 6.5 – Comparação numérica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de duas camadas

Figura 6.6 – Comparação numérica e analítica mediante o gráfico tensão vs pressão no defeito para o espécime de uma camadas

Figura 6.7 - Comparação numérica e analítica no modelo convencional

Figura 6.8 Comparação numérica e analítica no modelo com mesmo material no reparo.

Figura 6.9 Comparação numérica e analítica no modelo com diferentes profundidades do defeito

Figura 6.10 Resultados da modelagem matemática para o duto com reparo de aço inox 304

Figura 6.11 Resultados da modelagem analítica para o duto com reparo de aço de baixo carbono.

Figura B.1 – Dimensões do corpo de prova para o ensaio a tração

Figura B.2 - Gráficos tensão vs deformação dos corpos de prova de cada material

Figura C.1 – Tensões circunferências no defeito

Figura C.2 – Variação da tensão com a variação na espessura da camada de adesivo.

Figura C.3 – Modelos sm espessura de adesivo nas camadas.

Figura C.4 – Comportamentos nos modelos sem junção.

Figura D.1 – Tensões equivalente no espécime DRC 006.

Figura E.1 – Variante do método de reparo

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Métodos para cálculo da pressão de operação nos dutos com defeito.

Tabela 2.2 – Fatores importantes ao selecionar-se um adesivo [14]

Tabela 2.3 - Principais aderentes adesivos [14]

Tabela 2.4 - Características físicas de adesivos [14]

Tabela 3.1 – Propriedades mecânicas do duto e chapa 1

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas do duto e chapa 2 (bilinear)

Tabela 3.3 - Propriedades mecânicas do duto e chapa 2 (multilinear)

Tabela 3.4 – Tensões e deslocamentos radiais

Tabela 5.1 Espécimes testados

Tabela 5.2 Posição e orientação dos extensômetros elétricos

Tabela 5.2 Posição e orientação dos extensômetros elétricos

Tabela 6.1 Comparações de pressão no duto de quatro camadas

Tabela 6.2 Comparações de pressão no duto de três camadas.

Tabela 6.3 Comparações de pressão no duto de duas camadas

Tabela 6.4 Comparações de pressão no duto de uma camada

Tabela B.1 Propriedades mecânicas dos corpos de prova do ensaio a tração

Lista de Símbolos

- σ_{ii} : tensão normal ao plano “i”
 σ_{ij} : tensão cisalhante no plano “j”
 σ_i : tensão na direção principal “i”, onde $i=1, 2, 3$
 σ_c : tensão circunferencial
 σ_r : tensão radial
 σ_l : tensão longitudinal
 $\sigma_{tração}$: tensão num ensaio a tração
 σ_{Tresca} : tensão equivalente de Tresca
 σ_{Mises} : tensão equivalente de Mises
 σ_{eq} : tensão equivalente
 S_y : limite ao escoamento
 S_u : resistência a tração
 U_d : energia elástica de distorção por unidade de volume
 E : módulo de elasticidade
 μ : coeficiente de Poisson
 P : pressão
 L_{DC} : carga limite ao colapso plástico do componente danificado.
 L_{UC} : carga limite ao colapso plástico do componente sem defeito.
 $MAWP$: máxima pressão de operação admissível, determinada pelo código do projeto.
 $MAWP_r$: carga limite ao colapso plástico do componente sem defeito.
 e_c : deformação circunferencial
 e_l : deformação longitudinal
 e_r : deformação radial
 e_i : deformação na direção principal “i”, $i=1, 2, 3$
 de_i^p : incremento de deformação plástica na direção “i”.
 e_i : deformação total na direção i.
 e_i^p : deformação plástica total na direção i.
 e_{eq} : deformação equivalente
 P_1 : pressão interna
 P_2 : pressão externa
 R : raio medio
 ΔR : raio interno
 E_r : módulo de elasticidade das camadas metálicas

E_c : módulo de elasticidade do adesivo

E_m : módulo de elasticidade ponderado

e : espessura das camadas metálicas

t : espessura da parede do duto

$1/C$: fator de concentração de tensão

E_{pr} : Modulo de encruamento linear ou módulo de elasticidade no regime plástico das camadas metálicas

E_{pc} : Modulo de encruamento linear ou módulo de elasticidade no regime plástico do adesivo

μ_r : Coeficiente de Poisson das camadas metálicas

μ_c : Coeficiente de Poisson do adesivo

μ_{pr} : Coeficiente de Poisson das camadas metálicas no regime plástico

μ_{pc} : Coeficiente de Poisson do adesivo no regime plástico

μ_m : Coeficiente de Poisson ponderado

P_{yr} : Pressão que origina a plastificação nas camadas metálicas na região do defeito

P_{yc} : Pressão que origina a plastificação no adesivo na região do defeito

P_{yd} : Pressão que origina a plastificação do duto na região do defeito reparado

P_{ud} : Pressão de ruptura do duto na região do defeito reparado

σ_{eq_di} : Tensão equivalente no duto na região do defeito (i=I, II, III ou IV)

σ_{eq_ri} : Tensão equivalente no reparo na região do defeito (i=I, II, III ou IV)

σ_{eq_ci} : Tensão equivalente no adesivo na região do defeito (i=I, II, III ou IV)

S_{yd} : Limite de escoamento do duto

S_{yr} : Limite de escoamento das camadas metálicas

S_{yc} : Limite de escoamento do adesivo

S_{ud} : Resistência a tração do duto

a_k : variáveis 1, k=1.. 6

A_i e B_j : variáveis 2, i=1, 2, 3 e j=1, 2

h : profundidade do defeito

e_{aprox} : espessura aproximada para o reparo